

【研究紀要】

3D掃描技術應用於文化資產之適用性討論

The Study on the Applicability of 3D Scanning Technology Used for Cultural Heritage

張舜孔^{*} / 邵慶旺^{**} / 蔡育林^{***} / 陳俊宇^{****}

(Chang Shun-kung / Shao Ching-wang / Tsai Yu-lin / Cheng Juen-yu)

■ 摘要

隨著光學技術與電腦工業的發展，近年來3D掃描技術之發展日益躍進，於文化資產之應用也日益廣泛，且由於該技術具有非接觸性之優點，可在最低干擾與污染的情況下詳細記錄包括古蹟、遺址與文物等各類文化資產之表面立體型態，建立文化資產於該時空背景下之數位3D模型。然而市面上各類3D掃描儀器種類繁多，且文化資產於保存、修復、展示及教育推廣等各類別之工作對於數位3D模型需求亦不盡相同，因此根據任務需求選擇適合的3D掃描技術實乃進行3D掃描之最初也是最重要的工作之一。

本文嘗試對於不同解析度與精準度之各類3D掃描技術（包含地載光達、雷射掃描、結構光掃描、顯微3D等技術）應用於文化資產各項工作之適用性進行討論與分析；此外，由於各類3D掃描技術之原理不同，應用於建立各類文化資產之3D模型皆有不同的限制性，因此本文亦針對其限制性進行討論，期望文中所述之內容能提供非測量領域專業的操作人員於進行文化資產3D掃描工作前之參考。

關鍵詞：3D掃描，文化資產，解析度，精準度

*文化部文化資產局文化資產保存研究中心專案助理 (chtn0226@boch.gov.tw)

**文化部文化資產局文化資產保存研究中心助理研究員 (ch0223@boch.gov.tw)

***文化部文化資產局文化資產保存研究中心助理研究員 (ch0215@boch.gov.tw)

****文化部文化資產局文化資產保存研究中心專案助理 (chtn0222@boch.gov.tw)

收件日期：2013 / 10 / 28；接受日期：2013 / 12 / 5 Received Date: 2013 / 10 / 28；Accepted Date: 2013 / 12 / 5

■ Abstract

Three-dimensional scanning technology (3D scanning technology) has been widely applied in various fields, such as the automotive industry, medicine, the entertainment industry, architecture, cultural heritage, and so on. Because the shape of a certain cultural heritage item existed in a specific space and time, it can be scanned, and its 3D data may be collected and stored as a 3D model through 3D scanning technology with no need to make contact with the cultural heritage item. However, there are many kinds of commercial devices which can be utilized to perform 3D data acquisition and create 3D models. When 3D scanning technology is applied to different aspects of cultural heritage, such as conservation, restoration, exhibition, and education, the requirements of 3D modeling are different.

This paper performed a preliminary study on 3D scanning technology (Comprising Lidar, Structured Light 3D Scanner, Handheld Laser Scanner, Micro 3D scanner) with different levels of resolution and accuracy used to perform different kinds of cultural heritage tasks. The technology's limitations were also discussed. It is expected that the outcome of this study will be helpful for amateurs seeking to perform 3D scans of cultural heritage items.

Keywords: 3D Scanning, Cultural Heritage, Resolution, Accuracy

一、前言

在二維世界中僅能通過不同色彩與形狀的線條與色塊來表達或展現原作者的想法與意念，這些珍貴的二維文化資產可以通過經校色的相機或掃描器加以記錄，隨著相機或掃描器等二維記錄器解析度的提高，珍貴的二維文化資產（如畫作、書法、照片等）就能被更精細的記錄與保存。然而，我們的世界是真實的三維立體世界，當我們以毫米（mm）或微米（ μm ）的尺度來進行文物的觀察時，所有的文物均會成為三維立體的文物，例如保護層會覆蓋於顏料層上方、顏料會覆蓋於基底材上方、作者以不同的畫具與畫筆進行創作會使顏料產生截然不同的筆觸、紙張與照片的表面起伏亦會影響文物表面的粗糙度與反射率、不同材質的文物表面也會具有不同的紋理特徵。因此，廣義來說，人類世界中所有的有形文化資產都屬於三維立體文物，而若再加上時間軸線，則三維立體文物即會在四維空間中隨著時間軸的延伸而逐漸劣化與損壞，這種隨時間產生的劣化與損壞在目前仍為不可逆的現象，因此在特定時間下盡可能詳細記錄文化資產的3D形態即為目前文物保存工作人員努力的方向之一。

隨著光學技術與電腦工業的發展，近年來3D掃描技術之發展日益躍進，其非接觸性之優點，使3D掃描可在最低干擾與污染的情況下詳細記錄包括古蹟、遺址與文物等各類文化資產之表面立體型態，建立文化資產於該時空背景下之數位3D模型。理論上，文化資產保存工作人員均期望能夠獲得文物於該時間點

下最精細且最準確的3D模型，然而實際上文化資產保存工作常受限於空間、時間、經費與人力，因此相關工作需要針對其工作特性選擇適當解析度與精準度的數位3D模型，以期能在有限的資源中進行最完善的記錄。

在技術方面，除了各類以雷射與結構光為主的3D掃描器外，常應用於文化資產調查與記錄的技術還包括攝影測量（photogrammetry）技術（Reznicek and Pavelka, 2008; Karauguz, et al., 2009; Remondino, 2011; Schaich, 2013; Koutsoudis et al., 2013; Chane, et al., 2013），攝影測量主要是先以高解析度數位相機在多個不同的角度對待測物拍照後，再利用電腦軟體分析照片、計算並組建待測物之3D模型。由於透過攝影測量技術要建立高精度的3D模型需要多種條件的最佳化配合，如使用的相機、環境光源、拍照位置、拍照人員技術以及後製軟體所使用的數學演算方法等（Schaich, 2013; Koutsoudis et al., 2013），而非單純透過儀器量測就可獲得待測物之3D模型，所以在本文中並未將其納入討論中，有關3D掃描與攝影測量之詳細比較，讀者可按參考文獻所列之相關著作進行延伸閱讀（Guarnieri, et al., 2004; Kadobayashi, et al., 2004; Remondino, 2011; Radosevic, 2010; Koutsoudis et al., 2013）。

然而，就算單純使用3D掃描儀進行文化資產3D掃描，目前市售之3D掃描儀器種類繁多，儀器特性亦不盡相同，故根據工作需求選擇適合的3D掃描技術實乃進行3D掃描之最初也是最重要

的工作之一，故本文嘗試對於不同解析度與精準度之各類3D掃描技術（包含地載光達、雷射掃描、結構光掃描、顯微3D等技術）應用於文化資產各項工作之適用性與限制性進行初探。期望文中所述之內容能提供非測量領域專業的操作人員於進行文化資產3D掃描工作時之參考，另外，由於本文主旨並非專文探討各種3D掃描原理以及對於個別案例之應用情形，因此對於各類3D掃描原理以及更進一步的資料整合與應用並無著墨，有興趣的讀者可另行參閱其他文章，例如英國文化遺產機構（English Heritage）於2011年所出版的*3D Laser Scanning for Heritage*（second edition）、BIM Task Group 所編撰之*Client Guide to 3D Scanning and Data Capture*以及CIPA於2011年出版之*CIPA Heritage Documentation*。上述文章均可在網路搜尋並下載完整文件的PDF檔，相信對讀者會有一定的幫助。

目前國外已有許多專為文化資產保護與考古工作服務的3D相關公司，如數位考古學（Digital Archaeology，網址：www.digital-archaeology.com）、英國的3D考古學會（3D Archaeological Society，網址：www.3darchaeology.co.uk）日本3DNetworkJapan（網址：www.3dnet-j.com）（邱鴻霖，2013），國內方面亦有多位專家學者已投身於此一領域的研究中，其研究結果亦可供相關研究人員於實務操作時之參考（林承陽，2004；廖才詠，2004；陳英傑，2005；梁福榮，2006；宋周燕，2007；蔡宗旂，2007；姜智勻，2007；楊蠡嬪，2008；詹世偉，2009；林宜君，2009；王壽來等

人，2010；邵慶旺與張舜孔，2010；陳威全，2010；趙宜暄，2010；王壽來等人，2011；黃彥勳，2011；陳仲玉等人，2012；李家宇，2012；楊玉華，2012；曾欣郁，2012；王中平，2013；蔡建隆，2013）。



▲圖1. 文化資產中可應用數位3D模型的各工作類別。

Figure 1. The application of 3D scanning technology for cultural heritage.

圖片來源：張舜孔提供

二、解析度與精準度

可進行文物2D量測的工具種類繁多，從常見的各類尺規與各式捲尺，到可進行較精密量測的螺旋測微器、游標尺及位移計等測量工具，以及可進行精密量測的應變規（strain gage）、線性可差分變壓器（linear variable differential transformer, LVDT）及剖面儀等測量工具。以上各類2D量測工具配合適當的角度量測工具以及數學計算同樣可得到文物表面各量測點的3D座標（X, Y, Z），再透過電腦軟體將文物表面所有量測點繪製於虛擬的三維度空間中即可完成該文物的數位3D模型，然而代價是需要

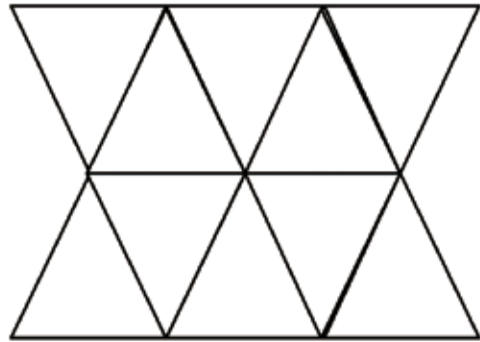
耗費大量的時間與人力進行量測，且文物在量測期間均處於高損壞風險中。因此，透過3D量測與掃描設備（以下統稱為3D掃描儀）在短時間內以非接觸的方式快速獲得文物的數位3D模型（以下統稱為3D模型）有其必要性。然而在應用3D掃描儀進行量測前，有兩個參數對於所透過3D掃描儀獲得之數位3D模型極為重要，其一是「解析度」（resolution），另一個則是「精準度」（accuracy），以下將針對解析度與精準度逐一進行詳述。雖然3D掃描儀仍具有許多其他重要的參數，但由於每一種儀器所採用的掃描技術與原理不盡相同，因此在本文中不會逐一進行討論。

（一）解析度

「解析度」是指3D掃描儀所建構之3D模型中點與點間最小的距離，以目前3D掃描儀所產出較常見的3D模型之格式：三角網格（triangle mesh）及點雲（point cloud）為例，三角網格的解析度即為三角網格的最小邊長（圖2），點雲的解析度則為點雲中點與點間的最小距離（圖3）。解析度的大小關係到3D模型的精細度，解析度越好代表3D模型中三角網格愈小或點與點間的距離愈小，反應到整個3D模型代表該掃描儀建構之3D模型愈能真實的反應原文物的表面起伏。

（二）精準度

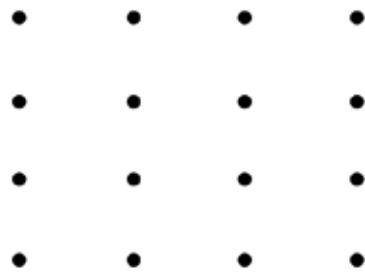
除了解析度之外，另一個重要的參數是「精準度」，精準度是指透過3D掃描儀所量測得到的量測值與真實值之間的



▲圖2. 三角網格示意圖。

Figure 2. The schematic diagram of triangle mesh.

圖片來源：張舜孔提供



▲圖3. 點雲示意圖。

Figure 3. The schematic diagram of point cloud.

圖片來源：張舜孔提供

差異。舉例來說，假設文物上固定兩點間的真實距離是10公分，假設3D掃描儀的解析度是0.01精準度是0.001cm（等同0.01cm以及10 μ m），則透過3D掃描儀量測得到兩點間間距為10.00cm \pm 0.001cm，因此透過該掃描儀我們可以獲得與真實文物極為接近的3D模型。然而高精準度的掃描儀卻不一定能夠獲得高精準度的掃描結果，其原因會在後續的文章中進行說明。

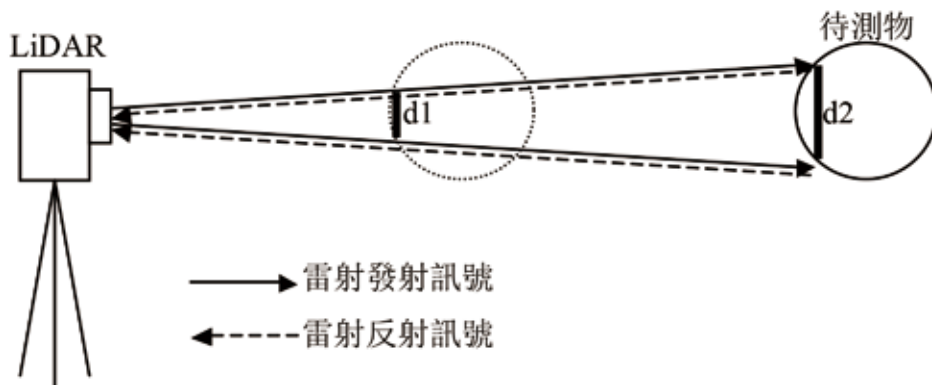
三、3D掃描儀之種類

目前市售之3D掃描儀包含地載光達、雷射掃描儀、結構光掃描儀以及顯微3D等技術，此外，尚有車載掃描與空載掃描系統，惟車載與空載掃描系統較為複雜，故本文未納入討論。各掃描儀運用的原理大致上可分為雷射掃描與結構光掃描兩類，雷射掃描又可分為單點掃描與線性雷射掃描兩類，如地載光達即可視為為單點雷射掃描，立架式與手持式雷射掃描則通常為線性雷射；而結構光掃描儀又包含立架式掃描儀與手持式掃描儀；至於最後顯微3D則是屬於光學顯微技術的進階應用，其技術不在前兩類的範圍內，因此後面會獨立介紹。

(一) 地載光達

地載光達（Light Detection And Ranging, LiDAR），或稱地面雷射掃描（Terrestrial Laser Scanning，簡稱TLS）

是透過儀器發射一高強度的雷射，雷射經過文物表面反射後被掃描儀的接收器接收，再透過電腦計算文物上該點位與掃描儀器之間的相對位置，從而決定文物該點位的空間座標（圖4）。常用的測量方式分為兩種，其一為透過脈衝式雷射進行量測，原理為自掃描儀發射單脈衝雷射，雷射至文物表面後產生反射，經由掃描儀接收反射的雷射後計算雷射的行走時間，再透過光速來計算文物表面量測點至掃描儀的距離，因此又稱為飛行時間法（Time of flight, TOF）；其二則為連續波相位位移式，原理是將不同頻率的雷射調制在同束雷射中，透過不同頻率雷射自文物表面反射後的相位差來計算文物表面量測點位與掃描儀之間的距離（張鈞傑，2006）。透過脈衝式雷射量測的3D掃描儀通常具有較佳的量測距離，其最大量測距離從數百公尺至數公里不等，但其精準度通常在公分（cm）等級；而透過相位差進行量測的3D掃描儀則具有較低的量測距離與較佳



▲圖4. 地載光達量測示意圖。

Figure 4. The schematic diagram revealing the characteristic of the resolution variation relating to the measuring distance in LiDAR 3D scanning system.

圖片來源：張舜孔提供

的精準度，其最大量測距離通常在數百公尺以內，精準度則在公釐（mm）等級。而其3D點位的解析度則與儀器和文物表面的距離有關，當儀器轉動角度固定時，文物距儀器愈近則3D點位的解析度愈高（圖4中d1小於d2）。由於地載光達是在定點進行掃描且不具穿透性，因此從該點目視會被遮蔽的區域在該次掃描中都不會獲得掃描結果，所以對於複雜的空間或是物件必須在數個不同的點位進行掃描，然後通過共軛球拼接多次掃描結果才能獲得完整的3D模型。

（二）雷射掃描儀

本文中所指的雷射掃描儀（laser scanner）不同於地載光達，其雷射強度較低，掃描所應用的原理不同，但解析度與精準度（通常為數公釐或微米[μm]等級）普遍都優於地載光達。雷射掃描儀是利用點狀或線狀雷射平穩的掃描過文物表面，通過單顆或多顆感測器即時偵測雷射在文物表面的型態，以電腦透過三角關係計算得到文物表面的3D起伏（張鈞傑，2006）。立架式雷射掃描儀通常需要固定在一組穩固且可精準移動掃描儀的機器台座或機器手臂上，以精準定位掃描儀與待測文物的相對位置，因此解析度與精準度通常較高，但缺點是掃描時常受限於機器台座或機器手臂的移動與轉動；而手持式雷射掃描儀則可以手持方式進行掃描，但掃描儀則需通過固定的參考點（反光貼紙）或經由其他外部訊號及設備（如紅外線、電磁波或其他方式）進行儀器的空間定位，因此在進行掃描時需於文物表面黏貼參考點（圖5）或保持掃描儀與定位設備間



▲圖5. 手持式雷射掃描儀。

Figure 5. Hand-held laser scanner.

圖片來源：邵慶旺提供



▲圖6. 結構光掃描儀。

Figure 6. Structured light scanner.

圖片來源：張舜孔提供

的通透性，且解析度與精準度通常較前述立架式雷射掃描儀為差。

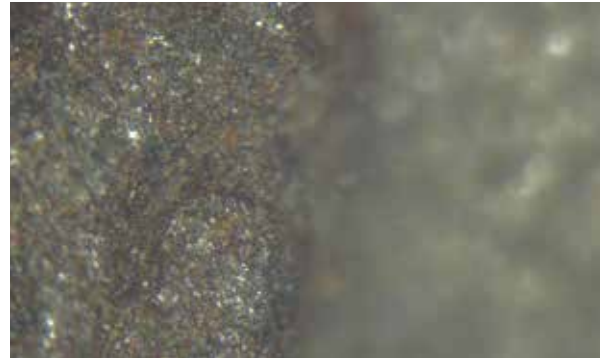
（三）結構光掃描儀

結構光掃描儀（Structured light scanner）是通過光源將具備特殊結構的光線（圖6）投射至文物表面，通過單顆或多顆感測器快速擷取光線在文物表面的起伏情形，透過電腦計算得到文物表面的立體形態（Geng, 2011）。以往結構光掃描儀的光源大部分是以白光為主，近幾年來為提高解析度，解析度較

高的藍光逐漸取代白光光源，另外尚有彩色結構光以及紅外線結構光的機種。由於白光結構光掃描儀的光線結構類似柵欄，因此又稱光柵掃描儀。結構光掃描儀也有立架式與手持式兩種，立架式掃描儀解析度與精準度較高（多為10微米（ μm ）至數十微米等級），通常需要架立在極為穩固的台座或腳架上才能進行量測；手持式結構光掃描儀的掃描速度較快，但解析度與精準度較低。此外，結構光掃描儀通常可透過文物表面的起伏變化進行3D模型的拼接，因此不一定需要在文物表面或周圍黏貼或布設定位點。關於詳細結構光的描述與介紹讀者可參閱Geng（2011）所著之文章「Structured-light 3D surface image: A tutorial」。

（四）顯微 3D

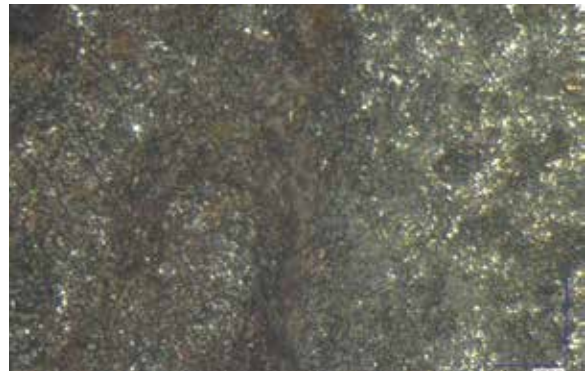
傳統光學顯微鏡通常具有較短的景深，且景深會隨著放大倍率的增加而逐漸縮小，文物表面的細微起伏在傳統顯微影像中會因短景深而無法在影像中清晰成像（圖7），此外，傳統光學顯微鏡通常不具備可移動性，因此對於不能搬運、不易搬運或不能取樣的文物，傳統顯微鏡常無法攜至文物存放的空間對文物進行觀察。顯微3D技術則是以感光元件（如CCD或CMOS）進行影像擷取與記錄，並透過電腦演算呈現文物表面細微的變化，該類儀器常被稱為數位顯微鏡。顯微3D技術是利用數位顯微鏡在顯微鏡觀察中逐步於觀察面的法線方向一面移動鏡頭，一面透過感光元件記錄不同對焦點的影像，再透過電腦演算以得到全焦段的清晰影像（圖8）（如



▲圖7. 一般顯微影像。

Figure 7. Tradational microscope image.

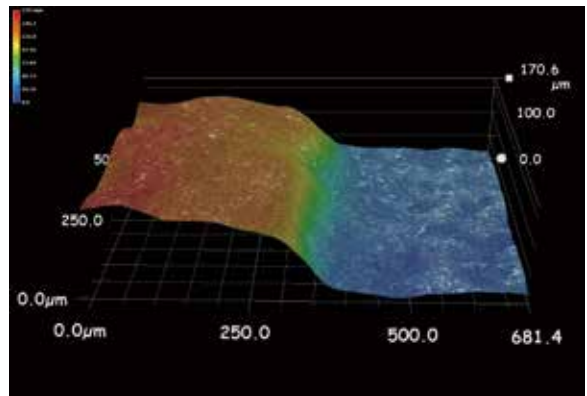
圖片來源：蔡育林、陳俊宇提供



▲圖8. 全焦段顯微影像。

Figure 8. Microscope image with DFD.

圖片來源：蔡育林、陳俊宇提供



▲圖9. 顯微3D影像。

Figure 9. Microscope 3D image.

圖片來源：蔡育林、陳俊宇提供

Depth from defocus, 簡稱DFD技術), 並獲得文物表面細微的3D起伏變化(圖9)(Pavlidis, et al., 2007), 其解析度與精準度通常可達到10微米(μm)以下, 此一解析度是大部分3D掃描儀都不能達到的。另外, 在此特別說明圖7、圖8與圖9是顯示同一範圍中的觀察結果, 且圖7與圖8的比例相同, 但由於受限於3D模型的傾斜角度, 3D模型較遠的部分會有透視縮小的效果, 因此無法使圖9中的3D模型呈現與圖7及圖8完全一致的比例, 為彌補此一缺點, 本文在圖9中加入刻度線, 讀者可自行按照刻度線之比例進行尺寸的換算與評估。

此外, 由於數位顯微鏡通常具有可移動性, 因此對於不能搬運、不易搬運或不能取樣的文物, 文化資產保存工作人員可使用數位顯微鏡對於文物進行調查與記錄, 此為傳統顯微鏡所不能提供的便利操作模式。

四、各類3D掃描儀之應用性與適用性

在上一小節中本文針對目前常見的3D掃描設備之原理與其概略之解析度與精準度進行了說明, 以下則進一步針對各類3D掃描儀應用於文物3D掃描時之應用性與適用性進行討論。

(一) 地載光達

在目前常應用於文化資產的3D掃描儀中, 地載光達在掃描速度與掃描距離方面較具優勢, 在單次掃描中地載光達通常可獲取接近360度的環場3D模型,

且透過共軛球可結合多次掃描結果獲得完整的空間資訊, 對於大範圍的古蹟、歷史建築、聚落、遺址、文化景觀與自然地景等掃描工作較為適用; 但對於古物、傳統藝術、民俗及有關文物等中、小型文物較不適用, 因為小型文物通常具有較複雜的表面起伏與轉角, 地載光達的雷射訊號易被表面起伏所遮蔽造成3D模型的缺損。此外, 雖然地載光達的工作速度較快, 但相較於結構光及雷射掃描儀, 地載光達之解析度與精準度相對較低, 且解析度與精準度會隨著量測距離而改變, 因此若要應用其進行文化資產損壞監測、鑑定與修復等工作時, 必須考慮地載光達的解析度是否合於需求。最後, 在實際應用時, 空氣中的水氣、粉塵、昆蟲與移動的人體都會在3D模型中產生許多雜點, 因此在執行掃描工作前需進行環境控制, 並且需要針對儀器擺放位置進行設計與規劃, 以減少3D模型中的雜點與不同掃描位置之3D模型間的合併問題, 如此應可有效縮短後製工作所需的時間。

(二) 雷射掃描儀

雷射掃描儀的解析度與精準度通常已進入數毫米或微米(μm)等級, 因此較適用於損壞監測等研究工作的範疇。立架式雷射掃描儀的解析度與精準度通常都優於手持式雷射掃描儀, 部分精密型的雷射剖面計或位移計的解析度與精準度甚至高於立架式結構光掃描儀, 但立架式雷射掃描儀的掃描範圍通常較小, 且不具移動性, 因此立架式雷射掃描儀不適用於大型與不可移動性之文物; 反之, 雖然手持式雷射掃描儀的

解析度與精準度較低一些，但可移動性為其最大優勢，因此對於一些不具移動性的文物通常可以透過手持式雷射掃描儀完成3D掃描作業，但手持式雷射掃描儀在運作時通常需要配合黏貼參考點或於可通視範圍內架設定位儀器。因此在進行文物掃描時，需考量文物表面是否可黏貼參考點，若不可黏貼參考點，那是否可在文物周圍黏貼參考點；或需考量文物周圍是否有足夠空間架設定位儀器，否則可能需要考慮是否改用其他種類的掃描儀器。另外，應用手持式雷射掃描儀進行掃描時，當環境光源的照度過強（或過弱）時，可能會造成感測器無法辨識掃描儀所投射之雷射而造成3D模型的缺損，此時需對環境光源進行控制（如以布幕或棚架遮蔽環境光源，或以燈具進行投光）以提高掃描的成功率及3D模型的完整性。

（三）結構光掃描儀

在目前常見的3D掃描儀中，立架式結構光掃描儀在解析度與精準度上較具優勢，但由於結構光掃描儀是以面狀進行文物掃描，單次掃描所獲得的資料量龐大，以往個人電腦或小型伺服器的運算速度並無法快速處理掃描資料，所幸近年來電腦技術日益進步，個人電腦或小型伺服器的運算速度已逐漸符合需求，因此結構光掃描儀的掃描速度已不亞於雷射掃描儀的掃描速度，故此類掃描儀器更適合用於記錄文物表面細微的起伏變化（如各類文物的製作痕跡、彩繪的筆觸、文物劣損處的細微形態等）。此外，手持式結構光掃描儀的掃描速度更快，但其解析度與精準度則普

遍低於立架式結構光掃描儀，因此手持式結構光掃描儀所建立之3D模型較適用於教育展示及文創商品等用途。不論立架式或手持式掃描儀都會受到環境光源的影響，因此在掃描時需對環境光源進行控制以提高掃描的成功率及3D模型的完整性。此外，市面上有罐裝噴霧式的消光粉（內容物常見的是二氧化鈦、碳酸鈣、氫氧化鋁等白色粉末，以及酒精、丙酮等有機溶劑），若文物表面反光嚴重，經評估消光粉不會對文物造成傷害或污染後，可在文物表面適當噴塗消光粉以利掃描作業的進行，惟消光粉顆粒通常很小，因此很難完全移除文物表面的消光粉，故是否使用消光粉需要謹慎的考量與評估。

最後需要特別說明，並非所有手持式結構光掃描儀的解析度都較低，目前市面上已有廠商推出解析度與精準度不亞於手持式雷射掃描儀的機種，未來該類儀器應可有效縮短掃描工作所需的時間以及增進掃描工作的便利性。

（四）顯微3D

顯微3D的解析度與精準度通常優於大部份的3D掃描儀；然而在相同記錄面積下，顯微3D的執行速度卻居於絕對的劣勢。因此顯微3D僅適用於文物微觀結構的觀察、記錄與量測，例如各類文物材質檢測、彩繪之彩繪層與保護層厚度檢測、文物表面污染物厚度檢測、結晶鹽形態檢測、指紋檢測與記錄以及各類文物微小損傷檢測等，但對於透光性較高的物體則不易有良好的檢測結果（如彩繪之保護層塗料、各類織品纖維、石

英結晶等)。除操作速度慢以外，數位顯微鏡仍有另外兩大缺點，其一是電力，數位顯微鏡需要供電才能操作，因此操作環境必須具備穩定的電力來源；再者是震動，由於解析度高，因此透過數位顯微鏡對文物進行顯微3D記錄時，必須對操作環境進行震動控制（例如避免大型車輛行經檢測區；關閉會造成震動的機具；或對文物進行遮蔽環境避免風造成文物震動等），避免微震動影響觀察結果的準確性。

最後，依據上述之討論，本文將各類大小文物所適用之3D掃描儀及掃描儀特性整理列於表1中，然而需特別說明的是表1中所列之適用儀器以及相關的

優點、缺點與解析能力是依照目前市面上常見之商用儀器進行描述與介紹，未來相信隨著3D掃描理論、技術、儀器與電腦設備的進步，表中所述之各種限制與缺點會逐漸減少。需要特別說明的是表1中所列之適用儀器，是指在短時間（如1~3天）內可完成單一對象3D模型的儀器，若時間、人力與電腦設備足夠，其他種類的儀器也可以應用於其他文物種類的掃描作業。此外，由於單一儀器的技術限制會使獲得之3D模型有缺損或缺乏表面色彩，因此國際上關於此方面之相關研究於近年來趨向於合併多種方法來建構完整的3D模型，例如結合3D雷射掃描以及攝影測量技術（Haala and Alshawabkeh, 2006; Reznicek and Pavelka,

表1. 各文物（遺址）適用之3D掃描儀及掃描儀特性

Table 1. List of historical relics that are suitable for 3D scanning and the characteristics of the scanned images.

文物種類及非文物種類	適用儀器	儀器優點	儀器缺點	解析能力
大型建築物，如古蹟、遺址、考古場址等	地載光達 (LiDAR)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 掃描距離長、速度快且單次掃描範圍廣，通常單次掃描即可獲得360度環場3D模型。 2. 可通過電池供電，不需額外供給電力。 3. 儀器穩定性高、輕便且操作簡易。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 水氣、粉塵、昆蟲與移動的人體等干擾源易使掃描產生雜點。 2. 解析度與精準度會隨著掃描距離的增加而逐漸變差。 3. 對大型空間進行2站以上的掃描時需擺放共軛球。 	解析度與精準度較差，通常為cm等級、少部分可達mm等級。
中型文物，如石碑、雕像、浮雕、壁畫等	手持式雷射掃描儀 手持式結構光掃描儀	<ol style="list-style-type: none"> 1. 儀器攜帶方便，具有良好的可移動性。 2. 可通過電池供電，不需額外供給電力。 3. 掃描時儀器可隨文物表面任意旋轉，因此不易有掃描死角，3D模型較完整。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 對於反光材質較不易獲得良好的掃描結果。 2. 通常需要配合黏貼參考點或於可通視範圍內架設定位儀器。 3. 作業時需控制環境光源。 4. 有效掃描距離較短，對於較遠的物體無法進行掃描。 	解析度與精準度通常為mm等級、少部分可達 μm 等級。

文物種類及非文物種類	適用儀器	儀器優點	儀器缺點	解析能力
小型文物，如出土（水）文物、陶器、瓷器、銅器等	立架式雷射掃描儀 立架式結構光掃描儀	1. 掃描解析度高，可詳細記錄文物表面的細微起伏變化。 2. 儀器自動化程度高，掃描過程中幾乎不需要人為調整。 3. 作業時通常不需要在文物表面黏貼參考點。	1. 對於反光材質較不易獲得良好的掃描結果。 2. 掃描範圍通常較小，且通常不具移動性。 3. 不能由一般電池供電，通常需要穩定的外接電源。 4. 作業時需控制環境光源與環境震動。	解析度與精準度通常為 μm 等級。
文物表面細微特徵，如裂隙、礦物結晶、織品纖維等	顯微3D	1. 可辨別極細微之表面起伏。 2. 儀器自動化程度高，檢測過程中幾乎不需要人為調整。 3. 部分儀器可攜至現場對不可移動、不可取樣的文物進行檢測。	1. 掃描面積小且速度慢。 2. 不能由一般電池供電，通常需要穩定的外接電源。 3. 由於解析度與精準度較高，因此作業時需要控制環境震動。	解析度與精準度通常在 $10\ \mu\text{m}$ 以下。

資料來源：張舜孔提供

2008; Andrade et al., 2012; Schaich, 2013; Chane et al, 2013)，或者可透過電腦斷層掃描（computed tomography），建立文物內部結構的3D模型（Panzer et al., 2013）。

五、結論

總結本文以上之敘述，目前大部分非接觸性的3D掃描技術均以光學技術為基礎，且需配合高運算能力的電腦，才能在較短的時間內建立高精細度與高精準度的3D模型，而各類3D掃描儀依照其原理與儀器設計會有不同的解析度、精準度、掃描速度與限制性，且文物種類與材質十分複雜，故同一臺掃描設備並不能完全適用於掃描任何文物，因此，

對文物執行3D掃描時需要依其需求、文物特性、周遭環境等條件篩選合適的儀器。此外，3D掃描技術雖已漸趨成熟，但仍有許多技術上的限制，本文將目前掃描工作可能遭遇的限制分點描述如下，期能使文化資產相關研究與工作人員對於3D掃描作業有更完整的認識：

1. 由於解析度與精準度愈高的掃描儀，對於環境溫度、濕度與環境震動的要求就愈嚴格，因此如需進行高解析度掃描，必須對於文物所處環境進行適當的控制。
2. 對於表面反光的文物（如鏡面金屬、有釉料的陶瓷器表面及高反光性的漆面等）或表面顏色較深沉的文物通常掃描結果較差（即3D模型中可能會具有較多的缺損），且掃描結果有時

會包含輕微的變形（精準度降低）以及較多的雜點，有時甚至無法進行掃描。

3. 受限於光學儀器的辨識率，對於文物中較細且深的裂縫通常無法進行3D掃描。
4. 受限於3D掃描儀器的尺寸，空間中較狹小的區域可能無法進行掃描，此外，對於目標物所有被遮蔽的區域亦無法進行掃描。
5. 最後，3D掃描的後製作業極為繁複與耗時，相較於掃描實際所耗用的時間，通常需要數倍或數十倍以上的時間才能完成後製作業（包括去除雜點、模型拼接及比對等相關工作），研究人員的經驗及電腦的運算速度均會影響後製所需時間，且後製過程中

對於文物3D模型的缺損是否需要以電腦軟體進行填補是另一項需要考慮的重點。

最後，本篇文章中所述及各類3D掃描設備之解析度與精準度為概略的趨勢，實際上同一類3D掃描儀其解析能力會隨著不同廠商及不同設計而有所改變，相關解析度與精準度會隨著前端3D掃描儀器技術的進步而逐漸成長，未來隨著3D掃描技術的逐步精進，可預期文化資產3D掃描作業與掃描成果將更細緻、精準、便利與經濟，或者，可結合電腦斷層掃描與3D掃描技術同時掃描文物之內、外部結構，以建立可描述文物內、外詳細結構之「全3D模型」。

參考文獻

王中平（2013）《應用三維雷射掃描儀於古蹟建物多期監測之評估》（碩士論文），國立臺北科技大學，土木與防災研究所。

王壽來，李麗芳，鄭明水，邵慶旺，張舜孔（2010）《立體科學調查數據之建立與應用研究：以清乾隆漢滿文御碑為例》，行政院文化建設委員會文化資產總管理處籌備處99年度自行研究計畫。

王壽來，李麗芳，鄭明水，陳柏欽，邵慶旺，張舜孔（2011）《文化資產微變異檢測技術研究》，行政院文化建設委員會文化資產總管理處籌備處100年度自行研究計畫。

宋周燕（2007）《攝影測量和透地雷達在數位典藏上之應用——以臺灣府城垣小東門段為

例》（碩士論文），國立成功大學，土木工程學系。

李家宇（2012）《3D都市尺度雷射掃描在建築數位典藏之應用——以新竹縣北埔鄉、竹東鎮及大臺北地區為例》（博士論文），國立臺灣科技大學，建築系。

林宜君（2009）《以數位方法再現臺灣傳統大木構架丈篙之可行性研究》（博士論文），國立成功大學，建築學系。

林承陽（2004）《3D雷射掃描在歷史建築數位模型之建構——以臺北市大龍峒保安宮為例》（碩士論文），國立臺灣科技大學，建築系。

邵慶旺，張舜孔（2010）〈立體量化模型應用於文化資產檢視紀錄與損壞檢測研究初探〉《2010文化資產保存科學國際研討會——非破壞檢測技術與應用》，臺南市。

邱鴻霖（2013）〈從考古學的角度看3D掃描與逆向輸出在出土人骨的應用以亮島人為例〉，《文物複製技術運用研討會》，臺北市，pp.220-246。

姜智勻（2007）《3D雷射掃描在歷史建築數位保存模型之網路系統整合應用——以三峽祖師廟為例》（碩士論文），國立臺灣科技大學，建築系。

徐偉城（2007）〈LIDAR與環境調查/監測/災害防救應用〉《國土資訊系統通訊》，p.61、pp.69-79。

張鈞傑（2006）《任意頻率調變式雷射測距儀》（碩士論文），國立中央大學，光電科學研究所。

梁福榮（2006）《攝影測量應用於古蹟記錄和邊坡表面變化量量測之研究》（碩士論文），國立成功大學，土木工程學系。

陳仲玉，邵慶旺，蔡育林，張舜孔（2012）〈臺灣考古出土遺物調查記錄方法之研究〉《2012 International Symposium on Archaeological Object Conservation – Present and Future Prospects of Fields Techniques in Archaeological Object Conservation》，韓國首爾，pp.38-48。

陳威全（2010）《3D雷射掃描技術應用於古蹟建築變形監測之研究——以臺中縣霧峰鄉林宅大花廳之木結構為例》（碩士論文），國立高雄大學，都市發展與建築研究所。

陳英傑（2005）《藉由影像重建三維典藏文物模型以及互動式即時繪圖系統》（碩士論文），國立清華大學，資訊工程學系。

曾欣郁（2012）《三維雷射掃描技術應用於傳統建築灰泥壁畫破壞檢測》（碩士論文），國立金門大學，土木與工程管理學系。

黃彥勳（2011）《應用Lidar及RFID技術於木構造歷史建築維護之探討》（碩士論文），國立臺北科技大學，土木與防災研究所。

楊玉華（2012）《3D雷射掃描應用於商業街區風貌分析之研究——以淡水老街為例》（碩士論文），國立臺灣科技大學，建築系。

楊纛嬪（2008）《3D雷射掃描技術在古蹟修復上之應用——以臺北市市定古蹟總督府山林課宿舍為例》（碩士論文），國立臺灣科技大學，建築系。

詹世偉（2009）《3D雷射掃描運用於歷史街區之研究——以臺北市齊東街為例》（碩士論文），國立臺灣科技大學，建築系。

廖才詠（2004）《3D雷射掃描在歷史建築數位管理系統之應用——以臺北市大龍峒保安宮為例》（碩士論文），國立臺灣科技大學，建築系。

趙宜暄（2010）《澎湖望安花宅曾家古厝建築變遷之數位化研究》（碩士論文），國立成功大學，建築學系。

蔡宗旂（2007）《3D雷射掃描在歷史建築數位模型之建構與應用——以長福巖三峽祖師廟為例》（碩士論文），國立臺灣科技大學，建築系。

蔡建隆 (2013) 《歷史老街火災模擬與消防策略初步研擬之研究——以金門明遺老街為例》(碩士論文), 國立金門大學, 土木與工程管理學系。

Barder, D., Mills, J., Andrews, D., Jones, D.M. (2011). *3D Laser Scanning for Heritage – Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture (second edition)*. English Heritage: Swidon.

Chane, C.S., Mansouri, A., Marzani, F.S., Boochs, F. (2013). Integration of 3D and multispectral data for cultural heritage applications: survey and perspectives. *Image and Vision Computing*, 31:91-102.

Geng, J. (2011). Structured-light 3D surface imaging: A tutorial. *Advances in Optics and Photonics*, 3:128-160.

Guarnieri, A., Remondino, F., Vettore, A. (2004). Photogrammetry and Ground-based Laser Scanning: Assessment of Metric Accuracy of the 3D Model of Pozzoveggiani Church. *Proceedings of FIG Working week 2004*.

Haala, N. and Alshwabkeh, Y. (2006). Combining laser scanning and photogrammetry : A hybrid approach for heritage documentation. The 7th International Symposium on Virtual Reality, *Archaeology and Cultural Heritage*, pp.163-167.

Kadobayashi, R., Kochi, N., Otani, H., Furukawa, R. (2004). Comparison and evaluation of laser scanning and photogrammetry and their combined use for digital recording of cultural

heritage. *Proceedings of the XXXV ISPRS Congress*, pp.401-407.

Karauguz, G., Çorumluoglu, Ö., Kalaycı, I., Asri, I. (2009). 3D photogrammetric model of Eflatunpınar monument at the age of Hittite empire in Anatolia. *Journal of Cultural Heritage*, 10:269-274.

Koutsoudis, A., Vidmar, B., Arnaoutoglou, F. (2013). Performance evaluation of a multi-image 3D reconstruction software on a low-feature artefact. *Journal of Archaeological Science*, 40:4450-4456.

Panzer, S., Gill-Frerking, H., Rosendahl, W., Zink, A.R., Piombino-Mascali, D. (2013). Multidetector CT investigation of the mummy of Rosalia Lombardo (1918–1920). *Annals of Anatomy*, 195:401-408.

Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Tsioukas, V., Chamzas, C. (2007). Methods for 3D digitization of Cultural Heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 8:93-98.

Radosevic, G (2010). Laser scanning versus photogrammetry combined with manual post-modeling in Stecak digitization. *Proceedings of the 14th Central European Seminar on Computer Graphics*.

Randall, T. and Philp, D. (2013). Client Guide to 3D Scanning and Data Capture. Building Information Modelling (BIM) Task Group: London.

Remondino, F. (2011). Heritage recording and

3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sensing*, 3:1104-1138.

Reznicek, J. and Pavelka, K. (2008). New low-cost 3D scanning techniques for cultural heritage documentation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII, Part B5: 237-240.

Schaich, M. (2013). Combined 3D scanning and photogrammetry surveys with 3D database support for archaeology & cultural heritage : A practice report on ArcTron's information system aSPECT3D. *Photogrammetric Week 2013*, pp.233-246.

Stylianidis, E., Patias, P., Quintero, M.S. (2011). CIPA Heritage Documentation. Best Practices and Applications, series 1, 2007 & 2009. CIPA – The ICOMOS/ISPRS Committee for Documentation of Cultural Heritage.